

模拟降雨条件下岩溶坡耕地产流产沙特征

方荣杰^{1,2,3}, 朱晓锋¹, 江斌伟¹, 莫华涛¹

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006;

2. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要:采用室内人工模拟降雨的方法,开展了翻耕措施下不同雨强(63 mm/h 和 100 mm/h)对岩溶坡耕地产流产沙过程影响的试验研究,结果表明:同一雨强下,坡度越大,产沙量越大;同一坡度下,雨强越大,地表以及地下孔隙流产生越快,而壤中流在坡度小于 5°时的 63 mm/h 雨强产流较快,坡度大于 5°时则 100 mm/h 雨强产流较快;同一坡度时,不同的雨强下产流均以壤中流为主,雨强越大,径流量越大,其中壤中流最大,地表径流最小。以上研究能够为揭示西南喀斯特地区坡耕地土壤水蚀原理和石漠化防治提供理论支撑。

关键词:模拟降雨; 坡耕地; 产流时间; 水文过程; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0011-06

Characteristics of Runoff and Sediment on Karst Slopes Under Experiment Conditions of Simulated Rainfall

FANG Rongjie^{1,2,3}, ZHU Xiaofeng¹, JIANG Binwei¹, MO Huatao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin,

Guangxi 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water

Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Simulated rainfall in laboratory was used to study the effects of various rainfall intensities (63 mm/h and 100 mm/h) on the processes of runoff and sediment erosion on sloping lands in karst area under plough. The results are as followings. First, with the same rainfall intensity, the steeper a slope land is, the greater the sediment yield is. Second, with the same slope conditions, the greater the rainfall intensity is, the faster surface runoff and underground pore flow generate water. Third, with the same slope conditions, runoff was interflow based on under different rainfall intensities, and there is the positive correlation between runoff and rainfall intensity. As for the runoff, interflow is the most while the surface flow is the least. The above findings can provide the theory for the revelation on the principle of slope land soil water erosion in southeast karst region and control for the rock desertification.

Keywords: simulated rainfall; slope farmland; runoff time; hydrological pathway; sediment yield

水土资源是人类赖以生存和发展的自然资源,人类的过度砍伐,陡坡开荒等不合理利用,以及降雨的冲刷使得越来越多的土壤随径流流失。我国西南地区岩溶广布,面积约 76 万 km²,其中以碳酸盐岩分布为主^[1]。水土流失因其对土壤性质、水生态环境和人类的身体健康有着极其重要影响而备受国内外学者

的关注。自然生态系统中土壤养分元素的损失途径以水文过程驱动的产流迁移(主要包括地表径流、壤中流、深层渗漏)和土壤侵蚀搬运损失为主,以矿化过程中的气态损失为辅^[2-3]。我国西南喀斯特地区地上地下二元结构发育,地表水大量漏失,坡地水文过程以地下过程为主,土壤地下漏失和地表流失并存^[4-6],

收稿日期: 2017-06-08

修回日期: 2017-08-02

资助项目: 国家自然科学基金(41301289, 51369009); 国家重点研究计划项(2016YFC0502403); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001)

第一作者: 方荣杰(1966—),男,广西桂林人,研究员,硕士生导师,从事水资源可持续利用与水环境保护研究。E-mail: glfrj@126.com

这使得喀斯特地区水文驱动的生源物质流失机理表现出明显的独特性。

降雨是形成岩溶区坡耕地的坡面径流的物质基础、动力基础,雨强作为降水的三要素之一,也作为影响岩溶区坡耕地的坡面径流以及产沙的最重要的降雨特性因子,其大小与径流以及产沙的发生过程有着密切的关系,雨强主要是通过降雨量以及雨滴对地表土壤的击溅溅蚀从而影响土壤的入渗、下垫面对雨水的分配^[7-9]。国内对耕作措施与土壤水蚀之间的关系也有大量的研究。有学者通过产流小区模拟降雨试验发现,垄向区田地是减少黑土土坡耕地水土流失的有效措施^[10]。在黄土区,郑子成等^[11]分析耕作措施对地表粗糙度的影响,认为糙度越大,产流时间越晚,产流量越小,侵蚀量也就越小。李裕元等^[12]的研究结果表明土壤翻耕导致入渗率下降 40%~60%,产流量增加 1 倍,产沙量增加 3 倍。虽然不少学者对岩溶区或非岩溶区中耕作措施对岩溶坡地土壤水蚀影响的定性分析,但相应的试验验证很少涉及。因此,本文以岩溶区石灰土坡耕地为研究对象,通过室内模拟降雨试验深入研究翻耕措施对石灰土降雨产流(地表径流、壤中流、地下孔隙流)、产沙(地表流失)过程的影响,将有助于揭示岩溶坡地土壤水蚀规律,为岩溶区水资源合理配置及石漠化防治提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

研究区设在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站木连试验综合研究示范区(108°18′—108°19′E,24°43′—24°44′N),该区为典型的喀斯特峰丛洼地,占地约 146.1 hm²,最低海拔高度 272.0 m,最高海拔高度 647.2 m,最大相对高差为 375.2 m。坡地、洼地平均基岩裸露率分别为 30%和 15%,相应的土层深度分别为 10~50 cm 和 20~160 cm。由于该地区的岩溶结构有丰富的岩溶孔隙,岩溶裂隙,同时具有地表地下二元的空间结构,在雨季降雨渗漏量大,极易形成水土资源分配不均,从而水分不能被植物利用,灌木、藤本和蕨类是该地区主要的自然植被。因此,试验所用的土壤皆取自中国科学院环江喀斯特农业生态试验站内的坡耕地石灰土。容重在取样地用环刀法测得。土壤经自然风干后,过 5 mm 的筛子,把土壤里的杂物去掉,测试土容重为 1.27 g/cm³。其土质组成比例分别为:砂粒含 3.7%,粉砂粒 47.4%,黏粒 49.9%。

1.2 试验设备

试验土槽为自制的坡度可调式钢板土槽,长×宽×高为(2 m×1 m×1 m)的长方体,坡度的可调节范围为 0°~20°。土槽底板均匀分布地打 6 个孔,且认为每个孔都属于岩溶孔隙,孔的直径为 5 cm,在土槽的下端安装了 V 型地表集流槽,集流槽通过连接水管收集产流到集流桶里,以便收集地表产生的产流和产沙到统一编号的集流桶里。在土槽的下端一侧安装了壤中流集流管,同样通过连接水管将产生的产流直接流到统一编号的集流桶里。在土槽的底板打孔处焊接了可以安装阀门的钢管,在阀门上连接水管以便收集产流到集水桶里。

降雨器采用侧喷式模拟降雨系统,由 4 个喷头组合而成,由一根安装有水压表的直立且固定在地面的钢管与蓄水池里的水泵连接,降雨高度达到 6 m,雨滴降落到地面的终点速度达到自然降雨雨滴的 90%以上,降雨均匀系数均在 0.8 以上,达到室内降雨的要求。采用不同的组合,能达到试验不同的雨强需求,喷头组合在空间上重合叠加,形成一个雨强均匀的降雨区。经测量降雨有效范围为半径 2 m 的圆形区域,降雨的雨强范围为 250~150 mm/h。

1.3 试验设计及样品分析

模拟降雨试验于 2014 年 7 月—2015 年 7 月在中国科学院环江喀斯特农业生态试验站的模拟降雨大厅内进行。本文研究在人工模拟降雨条件下,探讨不同坡度在翻耕措施下的产流产沙特征。翻耕处理的操作方法为:压实下层 20 cm 的土层(代表心土层),使其容重达到 1.2 g/cm³,而上层 10 cm 的土层直接均匀填装,使其容重达到 1.35 g/cm³,再人工翻耕两遍,然后将土表耙平。通过前人研究的结论发现^[13-14],由于喀斯特地貌的二元结构,小雨强的降雨在地表的产流能力很小,因此本文选取可控的两个雨强,即中雨强(63 mm/h)和大雨强(100 mm/h),降雨历时选择为 60 min。同时,据实地调查以及广西壮族自治区第二次土地调查数据得知,当地居民多在坡度为 15°以下进行农耕活动,全区共有耕地 443.1 万 hm²,全区耕地在 2°以下的有 160.6 万 hm²,占全区耕地的 36.3%,在 2°~6°的有 129.2 万 hm²,占全区耕地的 29.2%,在 6°~15°的有 98.6 万 hm²,占全区耕地的 22.3%,在 15°以上的有 54.6 万 hm²,占全区耕地的 12.4%,因此本试验设计的耕作措施中翻耕的坡度因子有 3 个,分别为 5°,10°,15°。

试验自降雨开始时计,在试验土槽下端和底板塑

料水管出水口处间隔 3 min 分别收集地表径流、壤中流和地下孔隙流泥沙样体积。收集产流泥沙样品后,待其自然沉淀 24 h 后,用不同规格的 PVC 量筒测量上层清水,获得产流数据。将沉淀在集流桶底部的泥沙样倒在有滤纸的漏斗中,过滤掉泥沙样品中的水分,然后放在烘箱里 24 h 烘干,烘箱温度为 105°,烘干后用精确度为 0.000 1 的电子天平称其重量包括滤纸的净重,通过计算,得出产流泥沙样品中的泥沙重量,对于产流泥沙样品中的水分忽略不计。滤纸事先放在烘箱里经过 24 h 烘干,用精确度为 0.000 1 的电子天平称得滤纸的净重。试验重复 2 次,共 12 场降雨。数据分析采用 Excel 2013 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 坡耕地初始产流时间及产流量

2.1.1 不同水文路径的初始产流时间 岩溶地质构造特殊,坡面地表径流并不发育,上坡快速流失的养分并未在坡麓和洼地富集^[15]。因此,地表水来不及汇集就直接入渗,影响地表径流产流时间。从图 1A 可以看出,在坡度为 5°时,地表径流产生约 200 s 后有壤中流发生,约 400 s 后地下孔隙流开始产流;坡度为 10°的地表径流开始产流约 1 200 s 后壤中流开始产流,约 1 800 s 后地下孔隙流开始产流;坡度为

15°的地表径流开始产流后约 180 s,2 200 s 后壤中流和地下孔隙流先后开始产流。在地表径流中,坡度为 10°和 15°的初始产流时间几乎一样,与坡度为 5°的初始产流时间相比较,提前了 3 倍。由此表明,在 63 mm/h 雨强下,坡度为 15°最快产生地表径流以及壤中流,但是地下孔隙流是延迟滞后至最后才发生,坡度为 5°的地表径流产流所需时间最长,但是壤中流以及地下孔隙流开始产流的时间均比 10°的短。

从图 1B 可知,在相同的坡度 5°下,100 mm/h 的地表径流和地下孔隙流的产流较 63 mm/h 的快,初始产流时间分别提前了 43%~14%,而壤中流的初始产流时间滞后了 1.5 倍;在相同的坡度 10°下,雨强 100 mm/h 与 63 mm/h 的地表径流的初始产流时间相差不大,前者较后者的壤中流以及地下孔隙流先发生产流,分别提前了 56%~43%;在相 15°坡,100 mm/h 与 63 mm/h 雨强下,地表径流均较快发生产流,前者较后者提前了 45%,二者的壤中流的初始产流时间相差不大,几乎同时发生产流;地下孔隙流的初始产流时间,100 mm/h 的较 63 mm/h 短,提前了约一半的时间。由上述可知,在相同的坡度,以翻耕作为耕作措施下,雨强越大,地表以及地下孔隙流产流越快发生,而壤中流在坡度小于 5°时试验中相对的小雨强产流较快,坡度大于 5°时则大雨强产流较快。

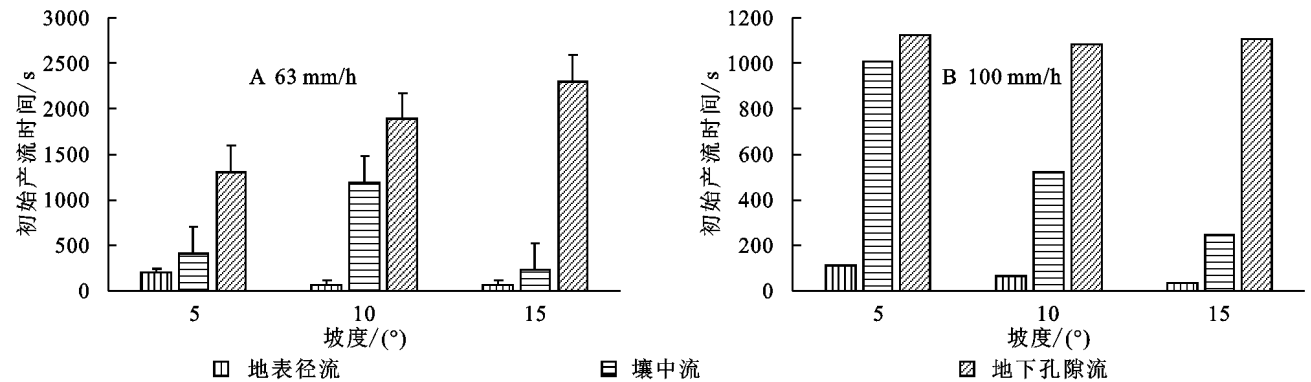


图 1 不同雨强下翻耕坡地的初始产流时间

2.1.2 不同水文路径的产流量 不同坡度的产流规律均表现出壤中流产流最大(图 2A)。在地表径流的总产流量中,坡度为 15°的坡耕地产流总量达到了 1.63 L,分别是 5°和 10°的地表径流总量的 2.9 和 1.8 倍。表明随着坡耕地的坡度增大,地表径流的产流总量也增大。壤中流的总产流量明显地较地表径流总量以及地下空隙流总量大。坡度为 5°的坡耕地壤中流产流总量最大,10°的坡耕地产流总量最小,5°和 15°的坡耕地产流总量分别为 10°的 1.22 倍和 1.15 倍。地下孔隙流的总产流量与地表径流的总产流量有着相反的趋势,

随着坡度的增大,产流总量变少,且坡度大于 10°时,产流总量急剧减少。在本次试验中,坡度为 15°的坡地产流总量只有 5°坡耕地产流总量的 2%,是 10°的产流总量的 3%。在雨强为 100 mm/h 条件下,不同水文路径中的产流总量与 63 mm/h 雨强的基本相同。从图 2B 可以看出,地表径流的产流总量随着坡度的增加而增大,均表现为:15°>10°>5°。在壤中流的径流总量中是以 5°坡的径流总量最少,10°和 15°坡的坡地产流总量分别是 5°的 1.26 倍和 1.24 倍,由此可见,10°坡与 15°的径流总量非常接近,即当坡度大于 10°的

时候,壤中流的径流总量差别不大,趋于稳定。而在地下孔隙流的径流总量中,15°坡的产流总量为最低,只有10°坡和5°坡的81%。由此表明,随着坡度的增加,地下孔隙径流的径流总量逐步减少。这与大部分学者通过研究总结,喀斯特坡地是以地下水文过程为主的结论一致^[4,15-16]。

2.2 不同雨强下坡耕地的水文过程

2.2.1 地表径流的产流特征 同一坡度下,不同雨强下的地表径流过程相似,产流量均在降雨初期有一个上升而后在一定范围内波动的过程,且随着坡度和雨强的增大,径流量就越大。从图3中可以看出,当在5°坡时,63 mm/h 的与 100 mm/h 雨强的地表径

流过程线整体相似,二者均在开始产流至9 min 内径流量快速增长,而后在一定范围内波动,100 mm/h 的波动范围比 63 mm/h 的大,即 100 mm/h 的不如 63 mm/h 的稳定;在相同的坡度为 10°时,雨强为 63 mm/h 的与 100 mm/h 的地表径流过程线相似,均在开始产流至 12 min 内径流量持续上升,之后径流量在一定范围内上下波动;在相同的坡度为 15°时,雨强为 63 mm/h 的与 100 mm/h 的地表径流过程线相似,63 mm/h 的在前 9 min 内径流量持续上升,之后的总体趋势维持着小幅度上升,100 mm/h 的在前 12 min 内径流量持续上升,之后的径流量总体趋势维持上升,波动较 63 mm/h 的大。

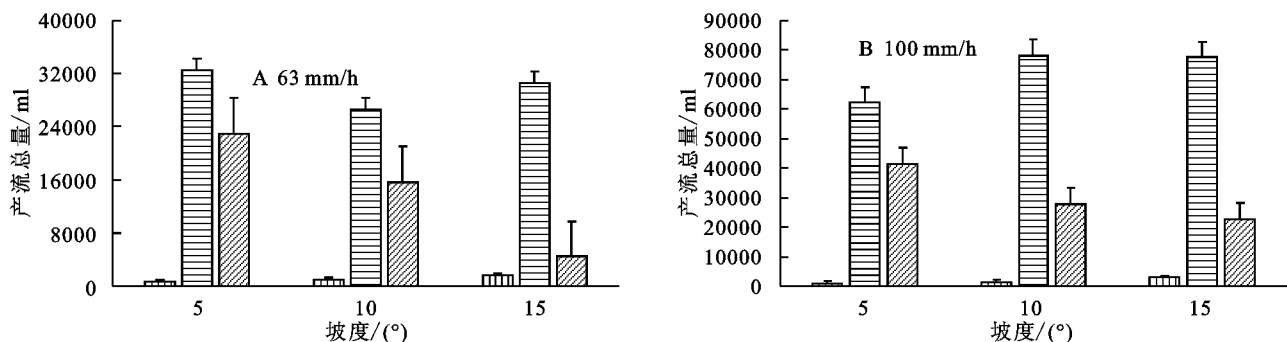


图2 不同雨强下坡耕地的产流总量

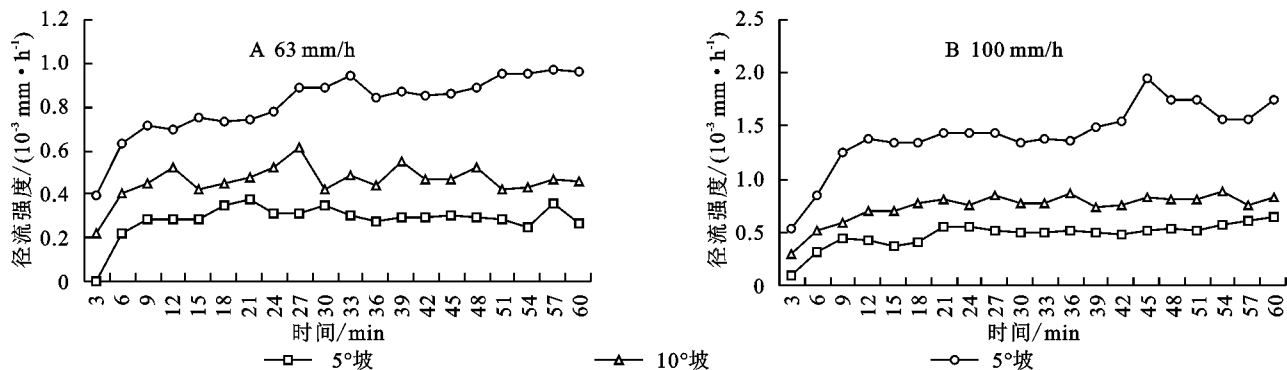


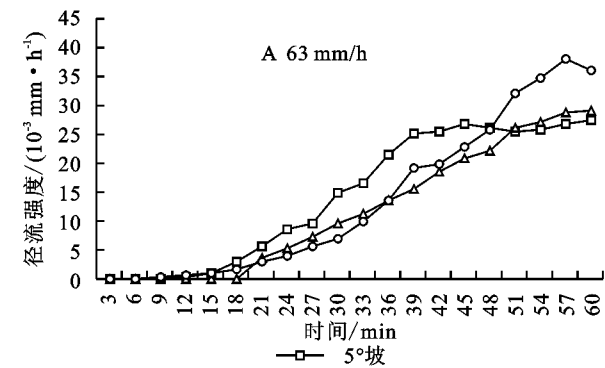
图3 地表径流的产流过程

2.2.2 壤中流的产流特征 相同的坡度,不同雨强下的壤中流产流过程均有一个持续上升的过程。从图4可以看出,在5°坡时,63 mm/h 雨强的壤中流径流量在开始产流至 39 min 内持续上升,之后趋于稳定,100 mm/h 雨强的壤中流产流量开始产流至 30 min 内快速增长之后趋于稳定;在坡度为 10°,雨强为 63 mm/h 时,开始产流后径流量持续增长,雨强为 100 mm/h 的在开始产流至 30 min 内径流量快速增长,之后趋于稳定;在为 15°坡时,63 mm/h 雨强的在开始产流后径流量持续增长,雨强为 100 mm/h 的在开始产流至 30 min 内径流量快速增长,之后趋于稳定。由此表明,在 5°坡翻耕时,不同雨强的壤

中流径流过程线相似,当坡度大于 10°时,相对的小雨强的径流量在降雨过程中始终保持着上升的趋势,相对的大雨强的径流量则在一个持续上升之后趋于稳定。

2.2.3 地下孔隙流的产流特征 同一坡度,不同雨强下的地下孔隙流产流过程均有一个持续上升的过程。由图5可知,在坡度为 5°时,雨强为 63 mm/h 的在开始产流后至 36 min 内径流量快速上升,之后的径流量维持着小幅度的上升趋势,雨强为 100 mm/h 的在开始产流至 30 min 内径流量快速增长,之后径流量趋于稳定;在坡度为 10°时,雨强为 63 mm/h 的产流时间较 100 mm/h 的迟,前者在开始产流后径流

量持续上升,在降雨末期径流量的增幅减小,100 mm/h 雨强的径流量在开始产流至 27 min 内快速增长之后逐步趋于稳定;在 15°坡时,63 mm/h 雨强的



径流过程线呈阶梯状,且在降雨末期出现了回落现象,100 mm/h 雨强的径流量在开始产流至 30 min 内快速增长,之后趋于稳定。

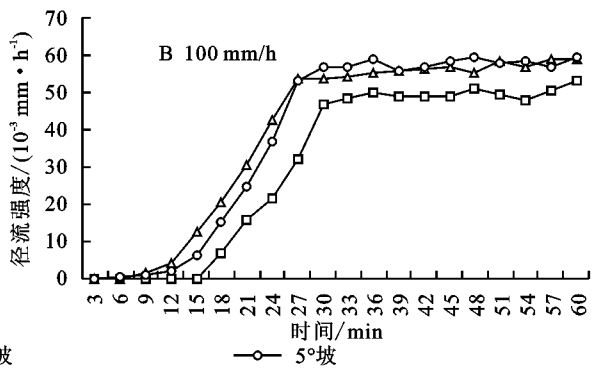


图 4 壤中流的产流过程

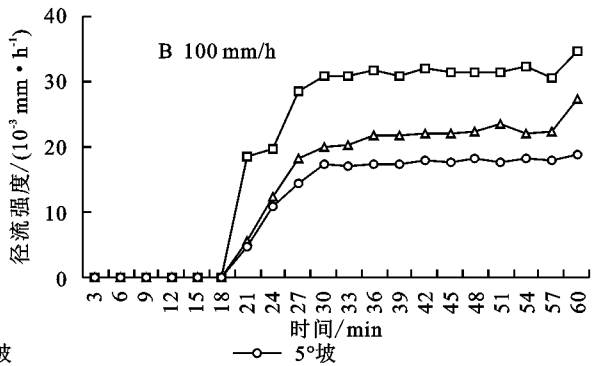
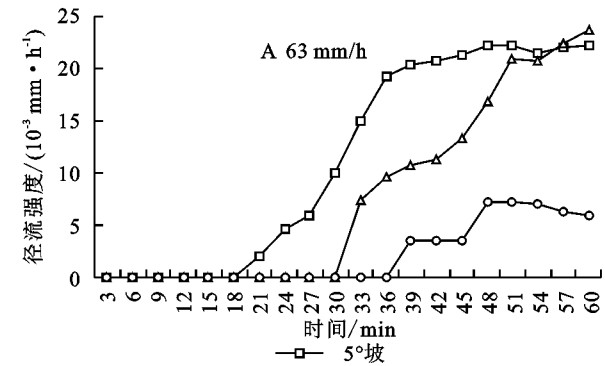


图 5 地下孔隙流的产流过程

2.3 雨强对坡耕地产沙量的影响

坡面径流是坡面产沙的主要影响因子,水流对地表岩石和土壤都有侵蚀的作用,土壤颗粒随着径流的冲刷而流失。不同的雨强下,不同坡度的产沙量不明显,且产沙量均表现为 15°>10°>5°(图 6)。当雨强为 63 mm/h 时,最大和最小产沙量分别为 16.8 g 和 7.3 g,且 15°的产沙量为 5°坡地的 2.3 倍,为 10°坡地的 1.3 倍,15°与 10°坡地的产量相差不大,总的趋势与 63 mm/h 雨强下的 3 个坡度的地表径流量趋势相反,随着坡度的增加,土壤流失量逐渐增大。当雨强为 100 mm/h 时,与 63 mm/h 的雨强条件下产沙趋势相似,最大和最小产沙量分别为 14 g 和 4.4 g,随着坡度的增大,土壤流失量也逐渐增大,但增量不明显。其中 10°,15°的产沙量分别是 5°坡的 2.6 倍、3.2 倍。由上述可知,当雨强一致时,坡度越大,产沙量越大,只是土壤的流失相对量很小,即坡度并没有对以翻耕作为耕作措施的岩溶区石灰土坡耕地产生明显的影响。

当坡度为 5°,10°和 15°时,100 mm/h 的雨强下的产沙量均比 63 mm/h 雨强下的产沙量少,雨强为 63 mm/h 的产沙量约为 100 mm/h 的 1.7 倍,当坡度为 10°时,这一比值为 1.1,当坡度为 15°时,这一比值

为 1.2,从比值上可知是相差极小的,但是坡地产沙量总值原本就很小,因此,在本试验中认为在该试验条件下,63 mm/h 与 100 mm/h 的雨强均没有对岩溶区坡耕地的产沙量产生很明显的影 响,但是 63 mm/h 的雨强在不同坡度条件下对坡耕地产沙量的影响比 100 mm/h 的雨强大。这与学者在黄土高原进行相关研究表明雨强越大,坡面径流侵蚀能力越强的结论有差异^[16-17]。一方面的原因由于耕地土壤中的有机质含量较高,抗冲性能强^[18],而径流量小,冲刷侵蚀土壤的能力变弱;另一方面的原因是由于雨滴打击地表使土层变得密实,雨强越大,雨滴动能和最终的速度就越大,对土层的密实作用就越强。

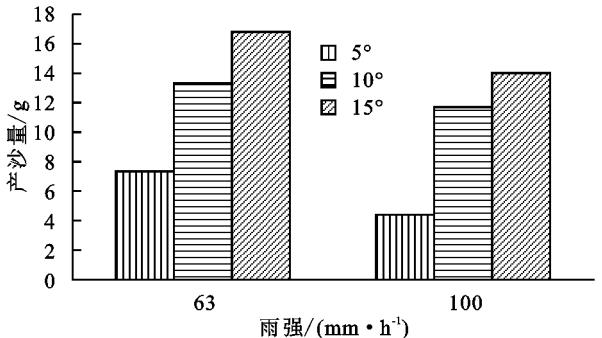


图 6 不同坡度的产沙量

3 结 论

(1) 雨强为 63 mm/h, 15° 坡度最快产生地表径流以及壤中流, 但是地下孔隙流是延迟滞后至最后才发生, 且径流量以壤中流为主, 其产流总量最高, 其次是地下孔隙径流, 地表径流产流总量最少; 雨强为 100 mm/h 时, 坡度只对地表径流和壤中流产生了明显的影响, 对地下孔隙流影响较小, 径流量和 63 mm/h 的有着相似的规律, 各个坡度下相应的产流过程亦与 63 mm/h 的相似。

(2) 同一坡度, 不同的雨强下, 径流量均以壤中流为主, 地表径流最少, 且地表径流量的绝对量较少, 因此产沙量较少; 同一坡度下, 雨强越大, 地表以及地下孔隙流产流越快发生, 而壤中流在坡度小于 5° 时试验中相对的小雨强产流较快, 坡度大于 5° 时则大雨强产流较快。

参考文献:

- [1] 周军红. 西南岩溶地区水资源信息系统构建[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(6): 271-275.
- [2] 姚长宏, 杨桂芳, 蒋忠诚, 等. 岩溶地区生态系统养分平衡研究[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 41-46.
- [3] Hedin L O, Vitousek P M, Matson P A. Pathways and implications of nutrient losses during four million years of tropical forest ecosystem development[J]. *Ecology*, 2003, 84: 2231-2255.
- [4] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- [5] 常勇, 吴吉春, 姜光辉, 等. 峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1050-1057.
- [6] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 1-14.
- [7] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011(S): 170-176.
- [8] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 模拟降雨条件下坡面流体力学特性研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 229-235.
- [9] 包含, 侯立柱, 刘江涛, 等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 70-75.
- [10] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 14-16.
- [11] 郑子成, 吴发启, 何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究[J]. 土壤, 2004, 36(3): 327-330.
- [12] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.
- [13] 甘艺贤, 戴全厚, 伏文兵, 等. 基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2754-2760.
- [14] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 24-28.
- [15] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 121-126.
- [16] Fu Z, Chen H, Xu Q, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: implications of field rainfall simulation experiments [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(5): 795-811.
- [17] Sun W, Shao Q, Liu J. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. *地理学报: 英文版*, 2013, 23(6): 1091-1106.
- [18] 唐丽霞, 张志强, 王新杰, 等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 800-810.
- [19] 蒋荣, 张兴奇, 纪启芳, 等. 坡度和雨强对喀斯特地区坡面产流产沙的影响[J]. 环境保护科学, 2012, 38(5): 13-17.